

論文

[2142] 接合目地部におけるCFRP筋の重ね継手に関する実験的研究

正会員○二井谷教治（オリエンタル建設技術研究所）

廣田 孝夫（沿岸開発技術研究センター）

正会員 関 博（早稲田大学土木工学科）

森下 昭吾（オリエンタル建設技術部）

1. はじめに

近年、繊維強化プラスチック(以下FRP)の開発が進み、その材料特性も日々改善され多方面での実用化が行われている。海洋環境下でも、このFRPの耐腐食性に着目し、コンクリート構造物の鉄筋の代替としてのFRP引張材の応用が進められている。特に、海洋構造物でのFRP引張材を用いたプレキャスト部材の利用は、プレキャスト化による海上施工の省力化はもちろん、かぶりの低減による部材の軽量化や接合部における耐久性の確保等においても有効な方法となる。一方、プレキャスト部材の接合に当っては接合方法の確立が必要となる。プレキャスト部材の接合方法としては、一般に目地部を設け場所打ちコンクリートによる方法が考えられるが、この場合引張材の継手を有することになる。継手の方法としては通常の鉄筋と同様に、重ね継手、機械継手等の方法が対象となるが、FRP引張材では重ね継手以外の方法は現状では困難である。そこで、図-1に示すような接合方法が想定されるが、この場合FRP引張材の継手長が問題となる。FRP引張材の場合、その引張強度は鉄筋に比べて大きく、これを有効に利用しようとする継手長が長くなり、結果として接合目地部の長さも大きくなるなどの問題も生じる。

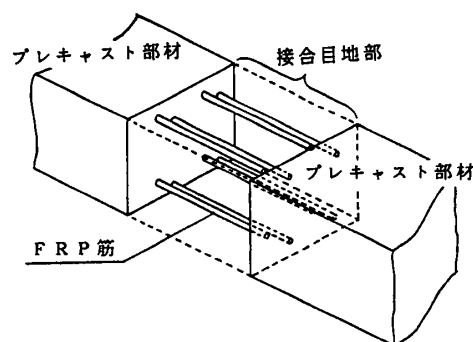


図-1 プレキャスト部材接合方法概念図

本研究はこれらの問題をふまえ、FRP引張材として炭素繊維強化複合材のより線(以下CFRP筋)を用いて、接合目地部で継手を有する部材の静的曲げ試験を行い、継手長が部材の曲げ特性に及ぼす影響について検討したものである。

2. 試験の概要

2.1 供試体の形状および種類

重ね継手の定着性能に影響する要因としては、重ね継手長、FRP筋の径、間隔またはかぶり、横方向筋等が考えられる。本実験では、重ね継手長のみをパラメータとして、定着長の検討を行った。供試体は、重ね継手長が20, 40, 60, 80cmの4種類と、その他に比較のため継手部を有しないもので、接合目地のあるものとないものの2種類の合計6種類とし、各種類2体ずつで構成した。

表-1 供試体の種類

記号	名称	継手長 l (cm)	接合 目地長 (cm)	主筋量	継手長間の横方向 筋量
1	NORM-N-1	無	無	φ7.5-4本	無
2	NORM-N-2	無	無	φ7.5-4本	無
3	NORM-J-1	無	110	φ7.5-4本	無
4	NORM-J-2	無	110	φ7.5-4本	無
5	L-20-J-1	20	110	φ7.5-4本	φ5-2本
6	L-20-J-2	20	110	φ7.5-4本	φ5-2本
7	L-40-J-1	40	110	φ7.5-4本	φ5-3本
8	L-40-J-2	40	110	φ7.5-4本	φ5-3本
9	L-60-J-1	60	110	φ7.5-4本	φ5-4本
10	L-60-J-2	60	110	φ7.5-4本	φ5-4本
11	L-80-J-1	80	110	φ7.5-4本	φ5-5本
12	L-80-J-2	80	110	φ7.5-4本	φ5-5本

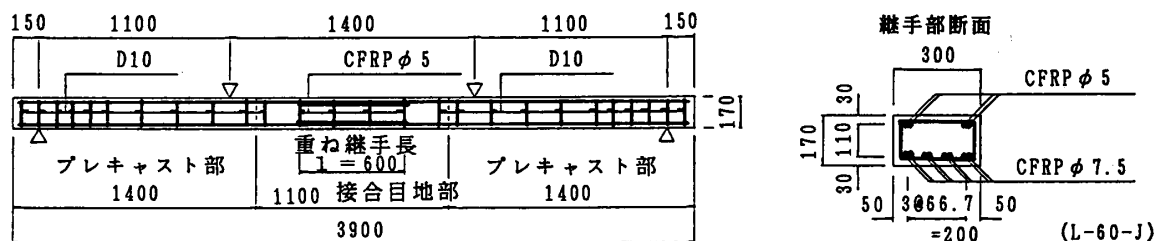


図-2 供試体の形状寸法

供試体の一覧表を表-1に示す。また、供試体の形状寸法の一例を図-2に示す。

2.2 使用材料

コンクリートは、プレキャスト部および接合目地部とも同一配合とした。接合目地部のコンクリー

トは、プレキャスト部のコンクリートを打設した14日後、圧縮強度が 300 kgf/cm^2 以上になったのを確認して打設した。CFRP筋は7本より線で、主筋として $\phi 7.5 \text{ mm}$ を使用し、重ね継手区間のスターラップとして $\phi 5 \text{ mm}$ を使用した。その他のスターラップはD10を使用した。載荷試験に際し、あらかじめCFRP筋の引張試験およびコンクリートとの付着試験を行った。それらの結果とCFRP筋の諸数値を表-2に示す。

2.3 試験方法

試験方法としては、まず、継手性能評価方法の1つである、土木学会「鉄筋継手評価指針(案)」[1]の高応力繰返し耐力性能試験方法を参考にした方法で、高応力繰返し載荷を行った。なお、同指針(案)では、継手自身の引張試験により、継手母材の降伏強度の95%となる荷重を30回繰返し載荷したときの伸び剛性の低下を調査することとしているが、本実験では、継手の構造から直接引張試験を行うことが困難なので、はりの曲げ試験でのたわみを測定し曲げ剛性の低下を調査した。荷重の載荷方法は、重ね継手部は純曲げ区間となるように、対称2点集中載荷とし、CFRP筋応力度が引張強度計算用値 f_{ud} の95%($=153 \text{ kgf/mm}^2$)となる荷重を上限、0を下限(実際には載荷治具の荷重が残り0ではない)として、10回静的に片振りで載荷した。その後、引続き破壊試験を行った。

測定は、支間中央のたわみ、CFRP筋のひずみ、ひびわれ幅、破壊耐力を中心として行い、ひびわれ性状および破壊性状を観察した。

3. 試験結果および考察

3.1 高応力繰返し載荷性能

支間中央での荷重～たわみ曲線の一例を図-3

表-2 CFRP筋の諸数値

呼び径 ϕ (mm)	応力度 計算用 断面積 (mm^2)	付着強度 計算用 表面積 (cm^2)	引張強度 (kgf/mm^2)		弾性係数 (kgf/mm^2)		付着強度 試験値 ^{*3} (kgf/cm^2)
			試験値 f_{ut}	計算用値 f_{ud}^{*1}	試験値 ^{*2}	計算用値	
5.0	10.1	—	217	161.5	15900	14000	—
7.5	30.4	31.4	205	161.5	14800	14000	34.5

注) *1 f_{ud} ; 引張強度保証値 ($f_{uk}=190 \text{ kgf/mm}^2$) の85%を計算用値とした。
 *2 CFRP筋にひずみゲージを貼付して測定した荷重-ひずみ曲線より求めた値。
 *3 10cm角のコンクリートに埋込まれたCFRP筋を引抜き、その抜け出し荷重(初期すべり荷重)を測定して求めた値で、この時、コンクリート圧縮強度は 359 kgf/cm^2 および 476 kgf/cm^2 について行ったが、コンクリート強度による差はなかった。

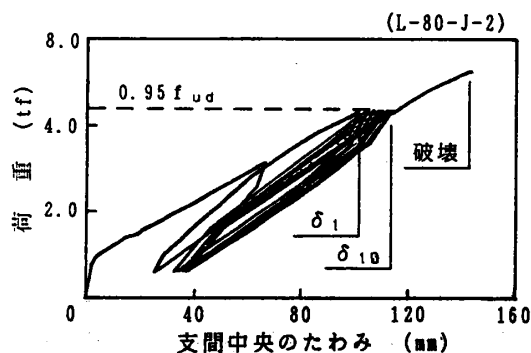


図-3 荷重～たわみ曲線

に示す。また、各供試体の高応力繰返し載荷試験結果およびその他の主要な試験結果を表-3に示す。

土木学会「鉄筋継手評価指針(案)」によると、高応力繰返し載荷をしたとき、載荷1回目の変位量を δ_1 とし30回目の変位量を δ_{30} とすれば、変位量の比 δ_1/δ_{30} が剛性の変化を示しており、その値が100%に近いほど剛性の低下が少ないことになる。同指針

では、この値が85%以上あればその継手は一般に高応力繰返し耐力性能を有するとしている。本実験では、繰返し載荷回数を10回としており、あくまで本実験の範囲内での試験結果について述べる。

載荷回数1回目と10回目の支間中央のたわみをそれぞれ δ_1 、 δ_{10} とすれば、表-3に示すように繰返し回数10回目までに破壊しなかった供試体はすべて、 δ_1/δ_{10} の値が85%を超えている。また、接合目地および継手のない供試体(NORM-N-1とNORM-N-2の平均値)を基準として、その値を100%とすれば、各供試体の値は97%~102%となり、ほとんど差が見られない。これらのことから、接合目地の有無は高応力繰返し載荷性能には影響せず、CFRP筋においても重ね継手による接合方法は可能であると考えられる。

3.2 たわみ性状

破壊荷重の小さい供試体L-20-Jを除く、各供試体種類について平均した支間中央のたわみを図-4に示す。まず、継手のない供試体について接合目地の有無について着目すると、荷重~たわみ曲線はほぼ一致している。このことから、接合目地による曲げ剛性の低下はないものと考えられる。

次に、継手の有無による影響をみると、継手のあるものの方が若干たわみが小さくなっており、しかも、継手長が長くなるにしたがって小さくなる傾向にある。重ね継手の部分では引張材量が2倍存在することになり剛性が大きくなるが、これはその傾向を示したものと考えられる。

表-3 試験結果一覧表

番号	名称	接合目地 の強度 f'_c (kgf/cm ²)	ひびわれ幅 (0.5 fud時) (mm)			高応力繰返し 載荷性能		破壊耐力		破 壊 性 状
			継 手 端 部	接 合 目 地 部	その他	$\frac{\delta_1}{\delta_{10}}$ (%)	相対 比較 (%)	荷重 (tf)	相対 比較 (%)	
1	NORM-N-1	350	—	—	1.23	93	100	5.34	100	破断
2	NORM-N-2	379	—	—	1.17	93		5.14		破断
3	NORM-J-1	391	—	0.78	1.16	95	102	5.58	104	破断
4	NORM-J-2	394	—	0.80	1.19	94		5.37		破断
5	L-20-J-1	402	0.91	0.67	0.63	—	—	2.86	54	付着1
6	L-20-J-2	400	0.80	0.54	0.81	—		2.84		付着1
7	L-40-J-1	372	0.76	0.68	0.62	—	—	4.38	83	付着1
8	L-40-J-2	423	0.86	0.62	0.79	—		4.35		付着1
9	L-60-J-1	392	1.01	0.80	0.97	91	98	4.87	88	付着2
10	L-60-J-2	409	1.18	0.67	0.99	91		4.36		付着2
11	L-80-J-1	400	1.09	0.90	1.05	91	97	5.29	101	破断
12	L-80-J-2	406	1.09	0.91	0.93	89		5.29		付着2

注) 破壊性状の説明 ・ 破断 : CFRP筋の破断
 ・ 付着1 : 繰返し載荷回数10回以内のCFRP筋の付着切れ
 ・ 付着2 : 破壊試験時のCFRP筋の付着切れ

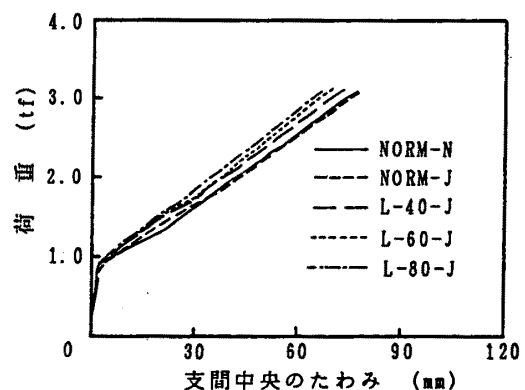


図-4 支間中央のたわみ

3.3 ひびわれ性状

FRP筋を用いたコンクリート部材の設計手法は、まだ確立されているとはいえない。そこで、本報告ではCFRP筋の応力度が、 f_{ud} の約50% (=81kgf/mm²)程度を使用時の応力度と仮定し、その応力レベルを中心に各供試体のひびわれ性状について特徴を述べる。

表-3のひびわれ幅の値は、CFRP筋の引張応力度が0.5 f_{ud} 相当荷重時の打継面(プレキャスト部と接合目地部の接合面)、継手端部およびその他の部分についての最大値である。これを見ると、接合目地を有する供試体のすべてが、打継面以外の所で最大値を示している。載荷試験時の観察でも、打継面には比較的低い荷重からひびわれが発生したが、その後ひびわれはその他の断面にも発生し、特に目立った打継面の開きは見られなかった。重ね継手を有するものは、そのほとんどが継手の端部で最大ひびわれ幅が発生した。またその値は、ばらつきはあるものの継手のない供試体の最大ひびわれ幅と特に大きな差はなく、継手長に対する傾向もみられない。

土木学会「コンクリート標準示方書」では、曲げひびわれ幅を次式のように示している[2]。

$$w = k_1 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{cs} \right] \quad (1)$$

ここに、 w : 計算ひびわれ幅(cm) k_1 : 鋼材の付着性状を表す定数(1.0または1.3)
 c : かぶり=2.5cm σ_{se} : 鋼材応力度の増加量(kgf/cm²)=CFRP筋応力度
 ϕ : 鋼材径=0.75cm E_s : 鋼材のヤング係数=1.48×10⁶kgf/cm²
 c_s : 鋼材の中心間隔 ϵ'_{cs} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響
 =6.7cm

ここで、本実験における諸数値を式(1)に代入し、ひびわれ幅とCFRP筋応力度の関係を求め、それを示したのが図-5である。同時に主要な供試体のひびわれ幅の実験値を示す。なお、 k_1 の値は付着試験の結果から異径鉄筋の場合と同様に1.0とした。ひびわれ幅はCFRP筋応力度が約50kgf/mm²を境にして、それより低い応力度では計算値より実験値の方が小さく、それより高い応力度では逆に大きくなっており、仮定した使用時の応力度では実験値の方が大きくなっている。

しかし、式(1)による計算値と実験値とでは上記のような傾きの違いがあるものの、供試体間のばらつきは少なく、目地の有無、継手の有無による影響はみられない。

以上より、CFRP筋を用いた部材のひびわれ幅を算定する方法は、式(1)とは別途考慮する必要があると考えられる。この場合、仮定した使用時レベルでは目地および継手の有無を考慮する必要はないと考えられる。

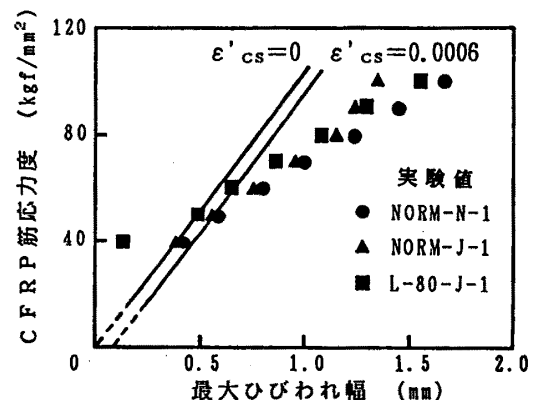


図-5 ひびわれ幅とCFRP筋応力度の関係

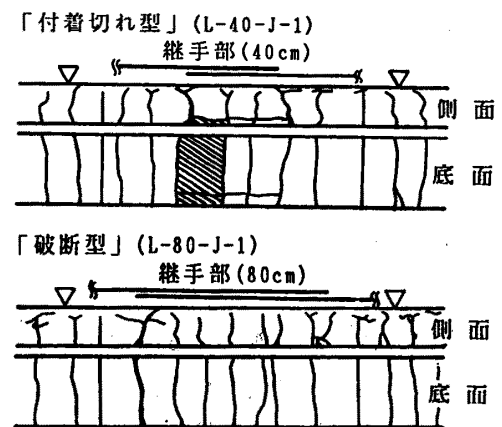


図-6 ひびわれ状況

3.4 破壊性状

破壊形態は大別して2通りある。1つはCFRP筋の破断により曲げ破壊する「破断型」で、もう1つは継手を有する供試体において、CFRP筋が破断する前にコンクリートとの付着が切れて破壊する「付着切れ型」である。「破断型」の場合、CFRP筋には鉄筋のような降伏現象がないのでCFRP筋が破断して急激に破壊する。「付着切れ型」の場合、破壊直前まで通常の鉄筋の重ね継手にみられるような縦ひびわれはみられず、縦ひびわれが入るとほぼ同時にかぶりコンクリートが剝離して、急激に破壊する。この原因の一つとして、横方向筋に使用したCFRP筋の量が少なかったことが考えられる。「破断型」と「付着切れ型」のひびわれ状況の一例を図-6に示す。

3.5 破壊耐力

表-3に各供試体の破壊耐力と、接合目地および継手を有しない供試体(NORM-N)の値を100%としたときの各供試体種類の相対値を示す。NORM-Nの破壊耐力は供試体の曲げ耐力を表しており、NORM-JおよびL-80-Jは、相対値が100%を超えている。したがって、破壊耐力に対しても目地は影響せず、継手長は80cm前後で曲げ耐力と同等の継手耐力を有すると考えられる。

鉄筋の定着長を算定する式はいくつかあるが、土木学会「コンクリート標準示方書」、同解説[3]およびOrangunによるもの[4]を、それぞれ式(2)、式(3)、式(4)に示す。

$$l_d = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 (f_{yd} / 4 f_{bod}) \phi \quad (2)$$

$$l_o = \left(\frac{f_y}{4 \sqrt{f'_c}} - 13.3 \right) \phi / \{ 0.318 + 0.795 \left(\frac{c}{\phi} + \frac{15 \cdot A_t}{s \cdot \phi} \right) \} \quad \text{ただし、} c/\phi \leq 2.5 \quad (3)$$

$$l_o = \left(\frac{f_y}{4 \sqrt{f'_c}} - 13.3 \right) \phi / \{ 0.318 + 0.795 \left(\frac{c}{\phi} + \frac{A_t f_{yt}}{133 s \phi} \right) \} \quad \text{ただし、} c/\phi \leq 2.5 \quad (4)$$

ここに、 l_d ：基本定着長(cm)=継手長

$\alpha_1 = 1.0$, $\alpha_2 = 1.3$, $\alpha_3 = 0.6$

A_t ：横方向鉄筋の断面積=0.0505cm²

f_y ：鉄筋の降伏強度(kgf/cm²)

=CFRP筋の引張応力度

s ：横方向鉄筋の中心間隔=20cm

f'_c ：コンクリートの圧縮強度

=393kgf/cm²

l_o ：必要定着長(cm)=継手長

ϕ ：鉄筋の直径=0.75cm

c ：かぶり=2.5cm

f_{yd} ：鉄筋の降伏強度設計用値(kgf/cm²)

=CFRP筋の引張応力度

f_{yt} ：横方向鉄筋の降伏強度=21700kgf/cm²

f_{bod} ：コンクリートとの設計付着強度

=34.5kgf/cm²

ここで、これらの式を用いて次のような操作を行う。まず、本実験に用いた供試体の諸数値を代入して定着長とCFRP筋応力度との関係を求める。次に、載荷荷重に対するCFRP筋応力度の関係から定着長と荷重の関係を求め、定着長に重ね継手長を代入したとき求まる荷重をその継手の持つ耐力と仮定する。そのようにして算定した継手長と耐力との関係を示したのが図-7である。また、表-2に示したCFRP筋

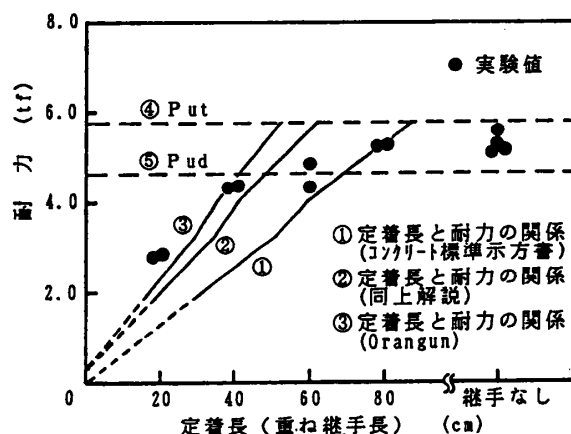


図-7 定着長と耐力の関係

の諸数値のうち試験値を用いて算定した曲げ耐力(P_{ut})と、計算用値を用いて算定した曲げ耐力(P_{ud})および各供試体の実験値もあわせて示す。

図-7において、CFRP筋が破断する場合の耐力の実験値と計算値④ P_{ut} との比較を行うと、実験値が計算値を10%程度下回っている。このことより、CFRP筋の品質のばらつきが予測される。つぎに定着長と耐力の関係に着目すると、実験値は前記3式による関係式とはいずれも傾きが一致しないことがわかる。このことより、3式による計算値と実験値では、付着強度や横方向筋の効果に対する評価が異なっていると考えられる。

また、継手長80cmの供試体では表-3に示すように、1体はCFRP筋の破断、1体は付着切れ破壊であり、その耐力の実験値は継手のないものと同等となっている。この継手長80cmは式(2)より算定される基本定着長にほぼ等しくなっており、本実験ではこの基本定着長の近傍が双方の破壊の境界付近となっていると考えられる。

さらに図-7では、式(2)より求めた関係式①と計算値⑤ P_{ud} とを結ぶ耐力の計算値を、すべての耐力の実験値が上回ることを示している。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 接合目地は、高応力繰返し載荷性能、たわみおよび破壊耐力に影響しない。
- (2) 高応力繰返し載荷性能を満足するためには、継手長は60cm(80 ϕ)程度以上必要である。
- (3) 最大ひびわれ幅は、継手端部に発生する。また、土木学会「コンクリート標準示方書」によるひびわれ幅算定式をCFRP筋を用いた部材に適用する場合、別途考慮が必要である。
- (4) 破壊耐力の実験値は、CFRP筋の計算用値を用いて算定した耐力および土木学会「コンクリート標準示方書」による基本定着長の式から算定した継手耐力の値を上回った。
- (5) CFRP筋の強度を活かすには継手長が約80cm(107 ϕ)必要となるが、CFRP筋でも重ね継手が可能である。

以上、本実験により得られた結果を挙げたが、継手長を短縮するためにも、今後、横方向筋が継手長に与える影響について検討する必要があると考えられる。

[謝辞]

本実験は、「繊維系素材(FRP)を用いた港湾構造物の研究開発に関する研究会」(運輸省港湾技術研究所、運輸省第四港湾建設局、(財)沿岸開発技術研究センター、東洋建設(株)、東亜建設(株)、五洋建設(株)、ピー・エスコンクリート(株)、オリエンタル建設(株)、富士ピー・エスコンクリート(株)、ドービー建設工業(株))の共同研究の一環として行ったものであり、多大の御協力と御指導を賜った関係者の方々に感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1]土木学会：鉄筋継手指針，コンクリート・ライブラリー，第49号，pp.13-16，1982.2
- [2]土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，pp.77-79，1986
- [3]同 上，pp.110-111，1986
- [4]Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E.: A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splice, ACI Journal, Mar, pp.114-122, 1977